

# Vermessung der Fließgeschwindigkeit alpiner Gletscher mit flugzeuggestützter differentieller SAR Interferometrie

A. Reigber, P. Prats,  
R. Scheiber, Chr. Andres,  
E. Erten, O. Hellwich

**Differentielle SAR Interferometrie mit flugzeuggestützten Sensoren erfordert eine hochgenaue Bestimmung und Korrektur der Eigenbewegung der Sensorplattform, bietet aber eine wesentlich höhere Flexibilität verglichen mit satellitengestützten Sensoren. Es können durch angepasste Befliegungen sowohl langsame, als auch relativ schnell vor sich gehende Bodenformationen analysiert werden. Dies wurde experimentell zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit alpiner Gletscher ausgenutzt.**

## 1 Einführung

Differentielle SAR Interferometrie (DInSAR) mit welt- raumgestützten Sensoren ist heutzutage eine etablierte Fernerkundungsmethode zur Beobachtung kleinster Bewegungen der Erdoberfläche [1–4]. Obwohl sehr effizient, so hat die Verwendung satellitengestützter Sensorik auch eine Reihe von Nachteilen. Durch sich verändernde Ausbreitungseigenschaften in der Atmosphäre können sich Phaseneffekte ergeben, die sich dann als Artefakte in der Deformationskarte niederschlagen. Des weiteren ergibt sich aufgrund der oft weit auseinander liegenden Aufnahmezeitpunkte häufig eine niedrige Bildkohärenz, was in vielen Fällen eine interferometrische Auswertung unmöglich macht [5].

Flugzeuggestützte Sensoren lösen viele der obengenannten Einschränkungen. So sind beispielsweise atmosphärische Einflüsse bei niedrigen Flughöhen und langen Wellenlängen ein vernachlässigbares Problem. Insbesondere bieten flugzeuggestützte Sensoren aber in vielerlei Hinsicht eine wesentlich höhere Flexibilität verglichen mit satellitengestützten Sensoren. Es können durch passende Befliegungen sowohl langsame, als auch relativ schnell vor sich gehende Bodenbewegungen analysiert werden. Des weiteren stehen auf Flugzeugen eine größere Bandbreite an Wellenlängen und sogar polarimetrische Systeme zur Verfügung. Probleme mit zu geringer Kohärenz können damit zwar nicht vermieden, aber in vielen Fällen stark verringert werden. Der wichtigste Punkt aber dürfte

die Möglichkeit sein, kurzfristig bei entsprechendem Bedarf eine Befliegung über einem bestimmten Gebiet durchzuführen.

Die flächenhafte Bestimmung von Gletscherbewegungen wurde in der Vergangenheit bereits sehr erfolgreich mit Hilfe satellitengestützter differentieller SAR Interferometrie durchgeführt. Leider ergibt sich hierbei aber häufig das Problem einer sehr niedrigen Kohärenz über den zu analysierenden Eisoberflächen, welche durch Schneefall oder Abtauen des Gletschers entstehen [6, 7]. Zudem ist das Aufnahmeintervall bei satellitengestützten Sensoren oft zu lang, was Dekorrelationseffekte weiter verstärkt und in vielen Fällen zu Eisverschiebungen führt, die bereits zu groß sind, um mit einer so empfindlichen Technik wie der differentiellen SAR Interferometrie gemessen zu werden. In solchen Fällen erscheint daher die Verwendung von flugzeuggestützter SAR Interferometrie sehr attraktiv.

## 2 Flugzeuggestützte SAR Interferometrie

Die Verwendung von Daten flugzeuggestützter Sensoren für die differentielle Interferometrie stellt erheblich höhere Anforderungen an die Prozessierungskette als es Daten satellitengestützter Sensoren tun. Insbesondere ist eine hochgenaue Korrektur der Eigenbewegung des Flugzeugs nötig, da sich diese andernfalls nicht von einer Deformation des Aufnahmegebiets unterscheiden ließe. Es wurde gezeigt, dass sich Bewegungsfehler von bis zu ca. 10–20 m in aktuellen Algorithmen problemlos korrigieren lassen, solange der aufgetretene Fehler genau bekannt ist. Selbst modernste Navigationssysteme, bestehend aus differentielltem GPS kombiniert mit Inertialsystemen, bieten aber nur eine Genauigkeit von etwa 10 cm. Daher sind, bei Verwendung von L-Band ( $\lambda = 25\text{cm}$ ), in etwa Phasenfehler von bis zu 360 Grad zu erwarten. Im folgenden sollen die wichtigsten Erweiterungen zur einer herkömmlichen interferometrischen Prozessierungskette beschrieben werden, die nötig sind, um auch mit flugzeuggestützten Daten eine hohe Phasengenauigkeit in differentiellen Interferogrammen zu erzielen.

## 2.1 Topographische Bewegungskompensation

In der Regel wird während der SAR-Prozessierung eine Bewegungskompensation in Bezug auf eine Referenzhöhe vorgenommen [8]. Dies ist im Fall starker Topographie nicht ausreichend: Wie in Abb. 1 dargestellt, verändert sich durch die Geländetopographie der lokale Einfallswinkel  $\theta$  und damit die nötige Korrekturlänge  $\Delta r$ . Zur Vermeidung von Restfehlern muss daher die genaue Geländeform der untersuchten Gegend berücksichtigt werden.

Um dieses Problem zu lösen, wurden in den vergangenen Jahren mehrere sogenannte TAD (topography- and aperture-dependent) Algorithmen zur Bewegungskompensation entwickelt. Zu erwähnen sind hier insbesondere das SATA [9] und das PTA [10] Verfahren, welche beide auf einer Zeit-Frequenz Analyse der Daten basieren. Ein TAD-Algorithmus basiert auf dem bekannten Zusammenhang zwischen Azimutzeit  $t$  und Dopplerfrequenz  $f_a$  im SAR Signal

$$f_a(t) = \frac{2v}{\lambda} \sin \beta = \frac{2v}{\lambda} \frac{t_0 - t}{\sqrt{r_0^2 + v^2 \cdot (t - t_0)^2}} \quad (1)$$

wobei  $\beta$  den Azimutwinkel bzw. Squintwinkel unter dem die Szene beobachtet wird,  $v$  die Vorwärtsgeschwindigkeit,  $\lambda$  die Wellenlänge und  $r_0$  und  $t_0$  die Bildkoordinaten des betrachteten Pixels bezeichnen. Gl. 1 bedeutet, dass einer Dopplerfrequenz im Signal direkt ein bestimmter Azimutwinkel zugeordnet werden kann. Wendet man also lokale blockweise Fouriertransformationen auf das fokussierte SAR-Bild oder direkt vor der Azimutfokussierung an, so lässt sich jedes Element der Fouriertransformierten über die Position des Blocks und den Squintwinkel mit einer bestimmten Position in einem bekannten externen Höhenmodell in Bezug bringen. Mit Hilfe der dortigen topographischen Höhe kann dann die dortige Bewegungskompensationsphase präzise ermittelt und als Korrektur eingeführt werden.

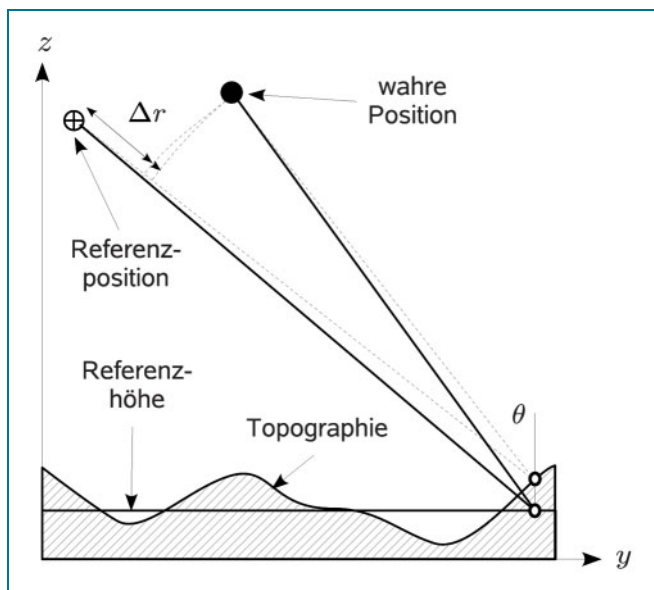


Abb. 1: Variation des Bewegungsfehlers bei Abweichung der Topographie von der Referenzhöhe

Aufgrund der blockweisen Verarbeitung der Daten kann es zu unerwünschten Phasensprüngen an den Blockgrenzen kommen, welche nach der Azimutfokussierung deutliche Nebenkeulen in der Impulsantwort hervorrufen können. Eine einfache Möglichkeit, um solche Phasensprünge zu minimieren, ist es, während der Bewegungskompensation 1. und 2. Ordnung anstatt einer fixen Referenzhöhe bereits die mittlere Höhe im von der jeweiligen Antennenkeule erfassten Bereich zu verwenden. Des Weiteren sollten sich die Datenblöcke im beschriebenen Verfahren deutlich überlappen, um Phasenunterschiede zwischen benachbarten Blöcken langsam ineinander übergehen zu lassen.

Ein weiterer zu beachtender Punkt ist die Zeit-Frequenz Auflösung der FFTs: Verwendet man eine kleine Blockgröße, so erhält man eine relativ geringe Frequenzauflösung und damit nur eine recht grobe Adaption auf die Topographievariationen innerhalb der Antennenkeule. Benutzt man eine sehr hohe Blockgröße, so kommt es zu einer sehr schlechten zeitlichen Aktualisierung der Korrekturen. In der Praxis ist hier ein Kompromiss zu finden, der sich an den aktuellen Gegebenheiten des Terrains und des Sensors orientiert. In [11] findet sich ein Vergleich der unterschiedlichen TAD-Algorithmen, auch in Bezug auf Auflösung im Zeit- und Frequenzbereich.

## 2.2. Bestimmung von Basislinienfehlern

Das zweite Problem bei der DInSAR-Prozessierung flugzeuggestützter SAR-Daten sind die bereits erwähnten Ungenauigkeiten in der Sensorposition. Restbewegungsfehler haben vor allem zwei Effekte: Zum einen kommt es zu einer fehlerhaften Korrekturlänge in der Bewegungskompensation, die zu entsprechend großen Phasenfehlern in den resultierenden Interferogrammen führen, die sich nicht von tatsächlichen Bodenbewegungen unterscheiden lassen. Zum anderen hat, wie in Abb. 2 dargestellt, eine durch Restbewegungsfehler um einen Winkel  $\beta$  falsch

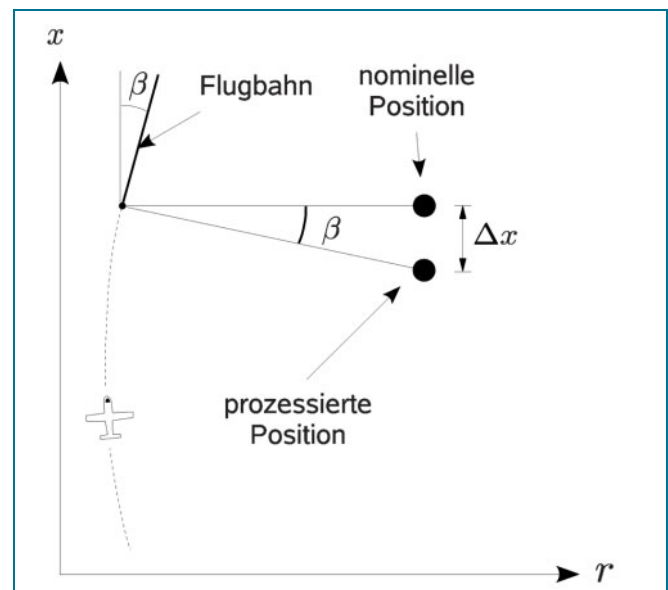


Abb. 2: Fehlerhafte Lokalisierung der Impulsantwort durch Restbewegungsfehler



verlaufende Sensortrajektorie auch zu einer fehlerhaften Lokalisierung der Impulsantwort in Azimut um

$$\Delta x = r \sin \beta \quad (2)$$

zur Folge. Es besteht also ein direkter Zusammenhang zwischen der Ableitung des differentiellen Restbewegungsfehlers in Azimut und der Verzerrung zwischen den Aufnahmen. Wie in [12] gezeigt wurde, lässt sich dies ausnutzen, um aus den interferometrischen Bilddaten selber den aktuellen Restbewegungsfehler zu bestimmen. Für eine Schätzung des Basislinienfehlers muss zuerst eine hochgenaue Koregistrierung der beiden interferometrischen Aufnahmen durchgeführt werden, um die Bildverzerrungen zu bestimmen. Dazu eignet sich insbesondere das sogenannte *Spectral-Diversity* Verfahren, welches die spektralen Eigenschaften der SAR-Aufnahme ausnutzt, um über eine Phasendifferenz die Missregistrierung  $x$  bis auf 1/100 Pixel genau zu bestimmen [13]. Eine Schätzung der Ableitung des gesuchten differentiellen Restbewegungsfehlers  $E$  kann dann durch

$$\frac{\partial}{\partial x} E = \frac{\Delta x}{r} \quad (3)$$

erzielt werden.

Ein großes Problem dieser Vorgehensweise ist jedoch das Auftreten von dekorrelierten Regionen, in denen keine Bestimmung der Ableitung möglich ist, da das *Spectral-Diversity* Verfahren auf interferometrischen Phasemessungen beruht. Um den Einfluss solcher Regionen zu verringern, kann eine Erweiterung des beschriebenen Verfahrens, die sogenannte *Multisquint*-Prozessierung verwendet werden [14]. Hierbei wird das Bild wiederum einer Zeit-Frequenz Analyse unterzogen und dabei im Rahmen der verfügbaren Azimutbandbreite in mehrere Subaperturen aufgespalten. Jede von ihnen projiziert den differentiellen Restbewegungsfehler auf andere Stellen im Bild, die möglicherweise unterschiedliche Korrelationsgrade besitzen. Durch Nutzung von Informationen aus anderen Aspektwinkeln mit Bereichen höherer Kohärenz kann also auch in einem an sich dekorrelierten Abschnitt des Bildes der differentielle Restbewegungsfehler bestimmt werden, zumindest solange sich innerhalb der gesamten Länge der synthetischen Apertur wenigstens eine kohärente Region befindet. Eine ausreichend hohe spektrale Separation der Subaperturen ist wichtig, um eine hohe Empfindlichkeit bezüglich der Restbewegungsfehler zu erhalten, wohingegen eine geringe Bandbreite der Subaperturen eine bessere Bestimmung hochfrequenter Fehler erlaubt [15]. Die optimale Wahl der Bandbreite der Subaperturen sowie deren Separation hängen sowohl von der Kohärenz, als auch von der Stärke der Bewegungsfehler und deren Charakteristik ab.

Problematisch in diesem Zusammenhang ist allerdings eine Bewegung der beobachteten Oberfläche zwischen den Aufnahmen. Ähnlich wie ein Restbewegungsfehler führt auch dies zu einer Verzerrung zwischen den beiden interferometrischen Aufnahmen und es kann daher zu Fehlinterpretationen kommen. Bedeutsam wird dies allerdings nur bei sehr starken Bewegungen, wie sie aber im Fall von Gletscheroberflächen durchaus vorkommen können. In [16] ist eine weitere Variante des obigen Verfah-

rens beschrieben, welche mit der zweiten Ableitung des differentiellen Restbewegungsfehlers arbeitet und so Einflüsse der Eigenbewegung der Oberfläche minimiert.

### 2.3. Basislinienskalierung

Eine bislang noch nicht erwähnte Problematik ist der Zusammenhang zwischen der effektiven interferometrischen Basislinie  $B$  und der Bewegungskompensation. Bei einem flugzeuggetragenen Sensor kann nicht von einer geradlinigen Flugbahn ausgegangen werden; es werden stattdessen geradlinige Referenztracks verwendet, auf welche die Bewegungskompensation durchgeführt wird. Diese Referenztracks werden bei interferometrischen Anwendungen gewöhnlicherweise parallel gelegt, um eine konstante Basislinie entlang Azimutrichtung sicherzustellen und eine Verdrehung der zweiten gegenüber der ersten Aufnahme zu vermeiden. Trotzdem ist aber für den interferometrischen Effekt der Topographie die reale Basislinie, also die Basislinie zwischen den real aufgetretenen Flugbahnen, verantwortlich.

Die verschiedenen Skalierungsfaktoren zwischen interferometrischer Phase und topographischer Höhe, die sich aus dem Unterschied zwischen der Basislinie der Referenztracks und der tatsächlichen Basislinie ergeben, müssen bei der Erstellung differentieller Interferogramme aus Daten flugzeuggetragener Sensoren berücksichtigt werden.

Zu diesem Zweck wird mit Hilfe des während der Bewegungskompensation verwendeten externen Höhenmodells und der Basislinie zwischen den beiden Referenztracks zunächst eine sogenannte *synthetische Phase* bestimmt, die der durch die Geländetopographie zu erwartenden interferometrischen Phase entspricht. Subtrahiert man diese von der tatsächlich gemessenen interferometrischen Phase so entsteht eine *Restphase*, bestehend aus zwei Termen: Abweichungen der Topographie von der des verwendeten Höhenmodells, skaliert mit der tatsächlichen Basislinie, und als differentieller Effekt eine eventuell aufgetretene Bewegung der beobachteten Oberfläche.

In der differentiellen SAR Interferometrie eliminiert man den Fehler des Höhenmodells, indem man zwei interferometrische Paare heranzieht, eines welches mit einem so kurzen zeitlichen Abstand aufgenommen wurde, dass keine Bewegungen zu erwarten sind und ein zweites, das eventuell eine Bewegung beinhaltet, aber natürlich den gleichen Fehler im Höhenmodell aufweist. Aus den beiden Restphasen bildet man über

$$\Phi_{diff} = \Phi_2 - \frac{B_2}{B_1} \Phi_1 \quad (4)$$

die differentielle Phase, wobei  $\Phi_2$  und  $B_2$  Phase und tatsächliche Basislinie des Paares mit Bewegung, sowie  $\Phi_1$  und  $B_1$  Phase und tatsächliche Basislinie des Paares ohne Bewegung darstellen.  $\Phi_1$  muss zudem vor der Skalierung abgewickelt worden sein. Zu beachten ist selbstverständlich, dass die Basislinien im Flugzeugfall sowohl von Azimut als auch von der Entfernung abhängig sind und obige Gleichung daher lokal gelöst werden muss.



### 3 Experimentelle Ergebnisse

Für die experimentelle Realisierung von flugzeuggestützter differentieller SAR Interferometrie wurden Daten des E-SAR Systems des DLR verwendet. Das E-SAR ist ein multifrequentes SAR System, welches im X-, C-, L- und P-Band arbeitet [17], wobei für die Befliegungen von Gletschern nur das L- und das P-Band eingesetzt wurde, um Dekorrelationseffekte klein zu halten. Die wichtigsten Systemparameter des E-SARs finden sich in Tab. 1.

Das E-SAR wird auf einem kleinen Turboprop-Flugzeug vom Typ Do228 betrieben, in typischen Flughöhen von 3500–4000 m und Fluggeschwindigkeiten von ca. 90 m/s. Diese relativ niedrige Flughöhe und die geringe Größe des Flugzeugs führen zu verhältnismäßig starken Bewegungsfehlern. Das E-SAR ist mit einem hochgenauen Flugnavigationssystem vom Typ CCNS4/Aerocontrol IId (kombiniert mit einem FUGRO OmniStar 3000L D-GPS Empfänger) ausgestattet, welches eine Genauigkeit von ca. 2–5 cm in der Bestimmung der Position und 0,01° in der Bestimmung der Lage des Sensors erlaubt. Testgebiet für die durchgeführten Untersuchungen war der Aletschgletscher in der Zentralschweiz, welcher das größte zusammenhängende Gletschersystem der Alpen darstellt. Eine Luftaufnahme von Teilen des Gletschers findet sich in Abb. 3. Am 27. und 28. Oktober 2003 sowie am 16. und 17. Oktober 2006 wurden vom E-SAR Daten im L-Band und P-Band aufgezeichnet. Auf Grund der

Tab. 1: L- und P-Band Systemparameter des E-SAR Sensors

Parameter	L-Band	P-Band
Wellenlänge	23 cm	86 cm
Trägerfrequenz	1300 MHz	350 MHz
Max. Pulsbandbreite	100 MHz	100 MHz
Azimutapertur	18 deg	30 deg
PRF/Kanal	400 Hz	500 Hz
Blickrichtung	links	links
Auflösung	1,5 m × 1,0 m	2,0 m × 2,0 m
Streifenbreite	3200 m	



Abb. 3: Luftbild des Aletschgletschers/Schweiz

Hochgebirgslage des Testgebiets musste die Flughöhe des Sensors auf etwa 5800 m angehoben werden. Die Daten wurden mit 100 Hz Azimutbandbreite und 100 MHz Entfernungsbandbreite prozessiert.

Das interferometrische Paar mit kurzem Zeitabstand zwischen den Aufnahmen (in diesem Fall 15 min), welches zur Bestimmung des Fehlers des Höhenmodells benötigt wird, wurde mit 10 m Basislinie aufgenommen. Für das zweite Paar wurde versucht eine Basislinie nahe Null zu realisieren.

Nach Durchführung der Bildprozessierung unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2 beschriebenen Besonderheiten und Abwicklung der Ergebnisphase ergibt sich das in Abb. 4a gezeigte DInSAR Deformationsmuster

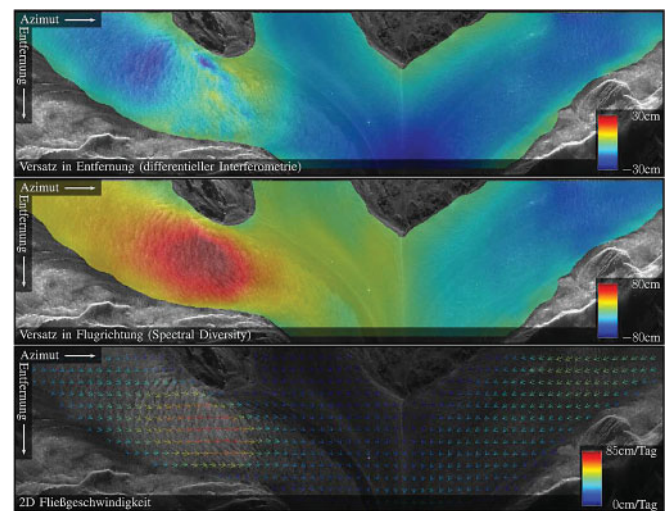


Abb. 4: Gemessene Gletscherbewegungen aus L-Band Daten von 2003. Oben: Across-Track Komponente (DInSAR). Mitte: Along-Track Komponente (SD). Unten: Überlagerung der Bildamplitude mit den verschiedenen Verschiebungsvektoren

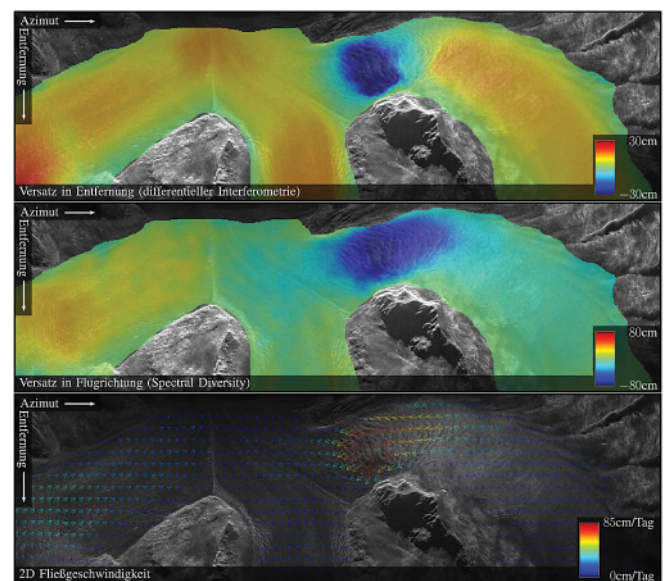


Abb. 5: Gemessene Gletscherbewegungen aus L-Band Daten 2006. Durch die veränderte Ausnahmegometrie treten die Bewegungsmuster anders hervor. Oben: Across-Track Komponente (DInSAR). Mitte: Along-Track Komponente (SD). Unten: Überlagerung der Bildamplitude mit den verschiedenen Verschiebungsvektoren

in Entfernungsrichtung. Die Bewegung des Gletschers in Azimutrichtung kann mit differentieller Interferometrie prinzipiell nicht bestimmt werden, daher kam hierfür ein weniger genauer Matching Ansatz basierend auf dem Spectral Diversity Verfahren [13] zum Einsatz (siehe Abb. 4b). Das insgesamt gemessene 2D Bewegungsmuster des Gletschers ist in Abb. 4c gezeigt, wel-

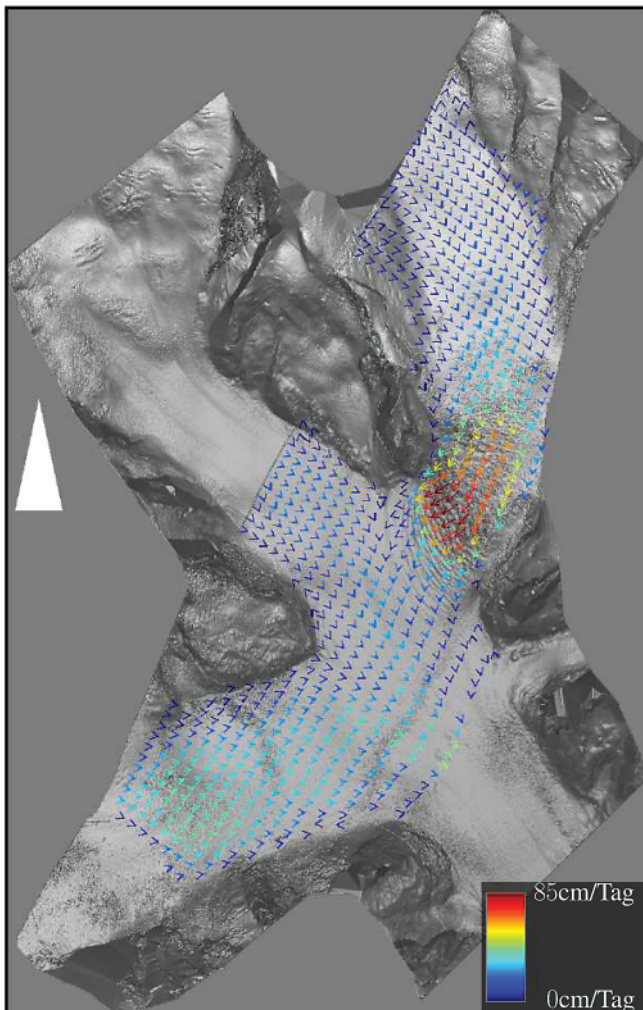
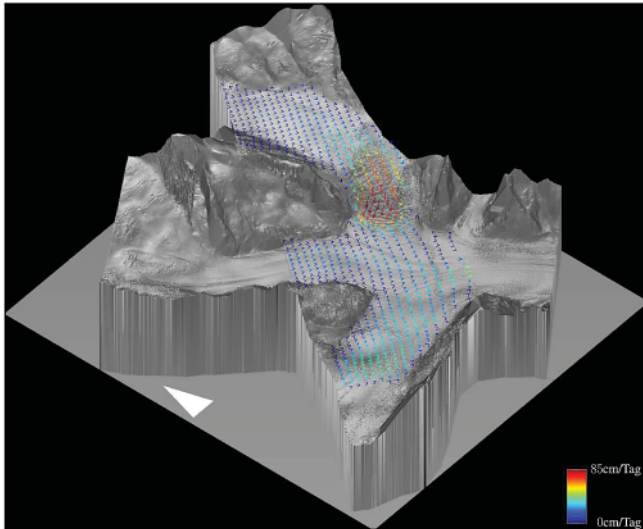


Abb. 6: Überlagerung von Höhenmodell und Verschiebungsvektoren abgeleitet aus den 2006'er L-Band Daten

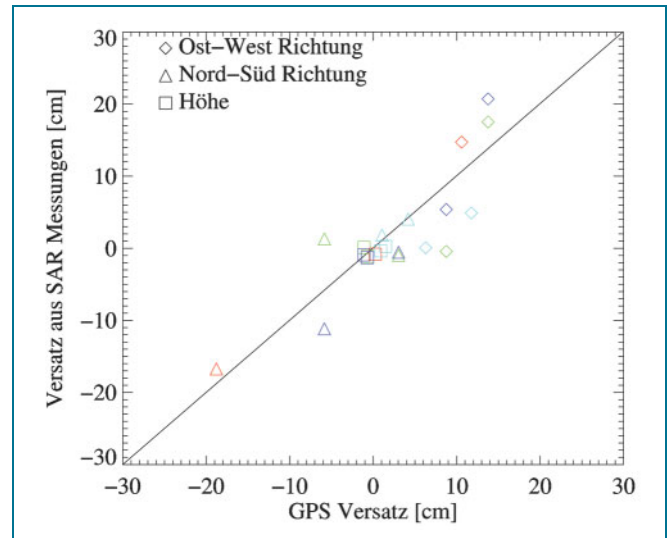


Abb. 7: Evaluierung der Genauigkeit mittels Winkelreflektoren. Die verschiedenen Farben entsprechen den verschiedenen Kampagne: Rot steht für die Aufnahmen 2003, wohingegen die anderen für die Aufnahmen 2006 im P- und L-Band stehen

che die örtlich variablen Bewegungen des Gletschers klar aufzeigt.

Überlagert man die gemessenen Verschiebungsvektoren mit dem zur Bewegungskompensation verwendeten Höhenmodell (Abb. 6), so lässt sich gut erkennen, dass der Gletscher erwartungsgemäß in Bereichen mit hohem Gefälle eine erheblich höhere Fließgeschwindigkeit zeigt als in den flacheren Bereichen.

Zeitgleich zu den Befliegungen wurden in-situ Messungen auf der Gletscheroberfläche vorgenommen. Dazu wurde die Position mehrerer SAR Winkelreflektoren, welche auf der Gletscheroberfläche platziert worden waren, mit Hilfe von differentiell GPS präzise verfolgt. In Abbildung 7 ist das Ergebnis des Vergleichs der aus DInSAR und Spectral Diversity bestimmten Verschiebungen mit der DGPS Ground-Truth dargestellt. Es zeigt sich insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung. Im Detail lassen sich allerdings Abweichungen von einigen Zentimetern beobachten. Vermutliches Hauptproblem ist im vorliegenden Fall das ungenügende zur Prozessierung verwendete X-Band DEM, dessen Phasenzentrum über Eisoberflächen signifikant von dem längerer Wellenlängen wie dem L- und P-Band abweichen kann.

## 4 Schlussfolgerungen

Differentielle SAR Interferometrie (DInSAR) ist eine leistungsfähige Fernerkundungsmethode zur flächenhaften Beobachtung kleinster Bewegungen der Erdoberfläche. Bislang konnte sie aus Gründen der verhältnismäßig instabilen Trajektorien von flugzeuggestützten Sensoren nur mit satellitengestützten Sensoren durchgeführt werden. Neue Entwicklungen in der SAR Datenverarbeitung, sowie genauere Navigationssysteme lassen mittlerweile aber auch Flugzeugsensoren für DInSAR interessant werden. Durch ihre generell erheblich höhere Flexibilität eröffnet dies eine große Anzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten.



Eine große Auswahl an Wellenlängen, Basislinien und Aufnahmeintervallen erlaubt es individuell auf die jeweilige Problematik optimierte Befliegungen zu realisieren. Es können so prinzipiell sowohl schnelle als auch langsame Bewegungen präzise erfasst werden, wobei bei Verwendung kurzer Wellenlängen Genauigkeiten bis in den Sub-Zentimeterbereich hinein in naher Zukunft durchaus als machbar erscheinen. Gleichzeitig können Flugzeugsensoren im Bedarfsfall schnell reagieren und eignen sich somit auch für den Katastropheneinsatz (z.B. bei Hochwassersituationen).

Im Moment befindet sich die flugzeuggestützte differentielle SAR Interferometrie noch in einer fortgeschrittenen experimentellen Phase. Wichtig für die nähere Zukunft sind daher weitere Genauigkeitsanalysen und exemplarische Studien, um diese vielversprechende Methode möglichst bald in eine operationell verfügbare Technik zu überführen.

## 5 Danksagung

Die Autoren danken dem RSL Team der Universität Zürich für die Vorbereitung der Kampagne und diverse Bodenmessungen. Die SWISAR Kampagne wurde mit Mitteln von „armasuisse“ durchgeführt.

## Literatur

- [1] GABRIEL, A. K.; GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H. A.: „Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry“, *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, pp. 9183–9191, 1989
- [2] MASSONNET, D.; ROSSI, M.; CARMONA, C.; ADRAGNA, F.; PELTZER, G.; FIEGL, K.; RABAUTE, T.: „The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry“, *Nature*, vol. 364, pp. 138–142, 1993
- [3] FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F.: „Permanent scatterers in SAR interferometry“, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 39, no. 1, pp. 8–30, 2001
- [4] LANARI, R.; MORA, O.; MANUNTA, M.; MALLORQUI, J. J.; BERARDINO, P.; SANSOSTI, E.: „A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms“, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 42, no. 7, pp. 1377–1386, 2004
- [5] HANSEN, R. F.: *Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001
- [6] STROZZI, T.; LUCKMAN, A.; MURRAY, T.; WEGMÜLLER, U.; WERNER, C. L.: „Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures“, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 40, no. 11, pp. 2384–2391, 2002
- [7] TROUVE, E.; VASILE, G.; GAY, M.; BOMBRUN, L.; GRUSSENMEYER, P.; LANDES, T.; NICOLAS, J. M.; BOLON, P.; PETILLOT, I.; JULEA, A.; VALET, L.; CHANUSSOT, J.; KOEHL, M.: „Combining airborne photographs and spaceborne SAR data to monitor temperate glaciers: Potentials and limits“, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* vol. 45, no. 4, pp. 905–924, 2007
- [8] MOREIRA, A.; MITTERMAYER, J.; SCHEIBER, R.: „Extended Chirp Scaling Algorithm for Air- and Spaceborne SAR Data Processing in Stripmap and ScanSAR Imaging Modes“, *IEEE Trans. Geosc. and Rem. Sensing*, Vol. 34, No. 5, pp. 1123–1136, 1996
- [9] PRATS, P.; REIGBER, A.; MALLORQUI, J. J.: „Topography-dependent motion compensation for repeat-pass SAR systems“, *IEEE Geosc. and Rem. Sens. Letters*, Vol. 2, No. 2, pp. 206–210, 2005
- [10] MACEDO, K. A. C. DE; SCHEIBER, R.: „Precise topography and aperture dependent motion compensation for airborne SAR“, *IEEE Geosc. and Rem. Sens. Letters*, Vol. 2, No. 2, pp.172–176, 2005
- [11] PRATS, P.; MACEDO, K. A. C. DE; REIGBER, A.; SCHEIBER, R.; MALLORQUI, J. J.: „Comparison of topography- and aperture-dependent motion algorithms for airborne SAR“, *IEEE Geosc. and Rem. Sens. Letters*, Vol. 4, No. 3, pp. 349–353, 2007
- [12] REIGBER, R.: „Correction of residual motion errors in airborne SAR interferometry“, *Elec. Letters*, Vol. 37, No. 17, pp. 1083–1084, 2001
- [13] SCHEIBER, R.; MOREIRA, A.: „Coregistration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity“, *IEEE Trans. Geos. and Rem. Sensing*, Vol. 38, No. 5, pp. 2179–2191, 2000
- [14] REIGBER, A.; PRATS, P.; MALLORQUI, J. J.: „Refined estimation of time-varying baseline errors in airborne SAR interferometry“, *IEEE Geosc. and Rem. Sens. Letters*, Vol. 3, No. 1, pp. 145–149, 2006
- [15] PRATS, P.; REIGBER, A.; MALLORQUI, J. J.: „Interpolation-Free Coregistration and Phase-Correction of Airborne SAR Interferograms“, *IEEE Gesoci. Remote Sens. Lett.*, vol. 1, no. 3, Jul. 2004
- [16] PRATS, P.; ANDRES, C.; SCHEIBER, R.; MACEDO, K. A. C. DE; FISCHER, J.; REIGBER, A.: „Glacier Displacement Field Estimation Using Airborne SAR Interferometry“, *Proc. of IGARSS 2007*, 2007
- [17] HORN, R.: „The DLR airborne SAR project E-SAR“, *Proc. of IGARSS'96*, Vol. 3, pp. 1624–1628, 1996

### Anschriften der Verfasser:

Dr.-Ing. ANDREAS REIGBER, Dr.-Ing. PAU PRATS,  
Dr.-Ing. ROLF SCHEIBER, Dipl.-Ing. CHRISTIAN ANDRES,  
Dipl.-Ing. ESRA ERTEN, Deutsches Zentrum für Luft- und  
Raumfahrt (DLR), Institut für Hochfrequenztechnik und  
Radarsysteme, Postfach 11 16, D-82234 Weßling,  
Tel./Fax: + 49-81 53 28-23 60/14 49,  
Email: andreas.reigber@dlr.de, pau.prats@dlr.de,  
rolf.scheiber@dlr.de, christian.andres@dlr.de,  
esra.erten@dlr.de

Prof. Dr.-Ing. OLAF HELLWICH, Technische Universität  
Berlin, Computer Vision and Remote Sensing,  
Franklinstraße 28/29 (FR3-1), D-10587 Berlin,  
Tel./Fax: ++ 49-3 03 14-2 27 96/21 10 04,  
Email: hellwich@cs.tu-berlin.de



## **Zusammenfassung**

**Flugzeuggestützte differentielle SAR Interferometrie erfordert eine hochgenaue Bewegungskompensation und stellt sehr hohe Anforderungen an die gesamte Prozessierungskette. Es wurden mehrere neuartige Verfahren vorgestellt, die nötig sind um qualitativ hochwertige differentielle SAR Interferogramme mit flugzeuggestützten Sensoren zu generieren. Es wurde dabei gezeigt, dass sich Eisbewegungen von alpinen Gletschern mit den beschriebenen Methoden zuverlässig vermessen lassen. Generell ermöglichen flugzeuggestützte Sensoren im Gegensatz zu Satellitensystemen sehr flexible DInSAR Untersuchungen zu beliebigen Zeitpunkten, mit variablen Aufnahmeintervallen, Basislinien und Wellenlängen.**

## **Abstract**

**Airborne differential SAR interferometry requires high-precision motion compensation and poses high demands on the entire processing chain. Several novel methods are presented, which are necessary for generating high-quality differential interferograms with airborne sensors. It is shown, that the ice motion of alpine glaciers can reliably be measured with the described methods. Generally, in contrast to spaceborne sensors, airborne sensors allow very flexible DInSAR studies at arbitrary times and with variable acquisition intervals, baselines and wavelengths.**